

**А. А. Ивлева, М. Н. Иванов**

**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
(г. Новосибирск, Россия)**

**Д. П. Антипин, В. М. Антонова**

**БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»  
(г. Сургут, Россия)**

## **ГЛАВНЫЙ АСПЕКТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИМЕНительно К ПОДАВЛЕНИЮ КОНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ПО ИМПУЛЬСНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (6-10) КВ**

В электроэнергетике России в настоящее время электрические сети напряжением (6-10) кВ являются наиболее протяженными, их общая длина составляет более двух миллионов километров. При этом сети именно среднего класса напряжений (ССН) являются наиболее аварийными и составляют около 70% всех нарушений электроснабжения потребителей. Особенно тяжелые последствия вызывают массовые гололедные и ветровые аварии на воздушных линиях (ВЛ).

Наиболее низкую надежность в работе имеют присоединения распределительных устройств (РУ) (6-10) кВ с высоковольтными электрическими двигателями, имеющими постоянный момент сопротивления на валу, и присоединения с индуктивной нагрузкой, коммутирующейся вакуумными выключателями (ВВ). Опасными для изоляции асинхронных двигателей являются коммутационные импульсные напряжения и временные коммутационные перенапряжения длительностью до 1 с, так как двигатели в этот момент имеют только индуктивную нагрузку. Пусковой ток содержит большую индуктивную составляющую и энергия, накопленная в индуктивности двигателя, максимальна. При неоднократных коммутациях это приводит к пробою изоляции.

В действующих РУ (6-10) кВ устанавливаются как масляные, так и вакуумные выключатели, но преимущество отдается последним. Достоинствами ВВ являются их малые габаритные размеры и высокая коммутационная износостойкость. К недостаткам этих выключателей можно отнести их способность генерировать повышенные импульсные напряжения и перенапряжения при коммутациях присоединений, особенно, с индуктивными элементами такими как трансформаторы и электрические двигатели.

Это обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Сейчас уровень износа электросетевого хозяйства России составляет около 40%. Рассматриваемая проблема ЭМС многогранна и одна из научно-технических задач - подавление кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП) по импульсному напряжению в сетях (6-10) кВ с токоограничивающими сдвоенными реакторами не решена. Из этого следует что тема статьи на сегодняшний день является актуальной.

Сложившаяся ситуация в электроэнергетике такова, что бесперебойное электроснабжение определяется надежностью действующего в настоящее время оборудования региональных электроэнергетических систем (ЭЭС). Поэтому актуален поиск путей продления срока службы действующего электрооборудования и сетей за счет улучшения параметров электромагнитной обстановки (ЭМО), обеспечивающих нормированные уровни ЭМС технических средств.

Такая постановка задачи требует изменения технологии эксплуатации, прежде всего электрических сетей (6-10) кВ.

Сети, содержащие вращающиеся машины, подразделяются на: сети генераторного напряжения; сети 6 кВ собственных нужд электростанций; сети (6-10) кВ компрессорных, насосных станций и другие сети специального назначения. Эти сети выделены в самостоятельную подгруппу сетей среднего класса напряжений, в силу того что к системе защитных мер предъявляются повышенные требования из-за относительно низкой электрической прочности их статорной изоляции по сравнению с электрической прочностью изоляции другого оборудования. Именно эти сети рассматриваются в данной статье. Для улучшения эксплуатации сетей, содержащих вращающиеся машины необходимо, в первую очередь, исключить воздействие на эти сети и электрооборудование кондуктивных электромагнитных помех. Причем осуществить это необходимо при неудовлетворительном состоянии устройств релейной защиты (УРЗА).

К сожалению, в настоящее время УРЗА в некоторых региональных ЭЭС страны не отвечают предъявляемым к ним требованиям из-за физического износа и изменения электромагнитной обстановки в электрических сетях. Проблема реконструкции УРЗА обостряется тем, что началось внедрение полупроводниковых и микропроцессорных устройств, которые, между прочим, на порядок чувствительнее к электромагнитным помехам, чем электромеханические.

Основной фактор, снижающий надежность сетей среднего класса напряжения – частая поврежденность изоляции различных элементов сетей и силовых трансформаторов.

При коммутации высоковольтных двигателей, воздушных и кабельных линий, силовых трансформаторов, дуговых однофазных замыканий на землю (ОДЗ) в сетях с изолированной нейтралью и с резонансно заземленной нейтралью возникают искажения напряжения в виде импульса напряжения и временного перенапряжения.

Перенапряжения подразделяются, в общем случае, на грозовые (атмосферные) и внутренние (временные) перенапряжения. Грозовые импульсы могут проходить в узлы нагрузок от 6 до 10 кВ с высоковольтными электрическими двигателями только через силовые трансформаторы. Межобмоточная емкость трансформаторов имеет небольшое значение, а емкость всей сети от 6 до 10 кВ на несколько порядков больше и поэтому амплитуда грозовых перенапряжений в электрических сетях значительна, а определяющим для них являются внутренние перенапряжения.

Внутренние перенапряжения в электрических сетях делятся на перенапряжения, зона действия которых охватывает все оборудование ССН (при однофазных дуговых замыканиях на землю и феррорезонансные явления), и перенапряжения, возникающие на присоединениях при их коммутации (при включении и при отключении). Первая группа перенапряжений охватывает все электрооборудование, которое присоединяется к распределительным устройствам, существенно зависит от способа заземления нейтрали сети. Вторая группа перенапряжений за счет небольшой протяженности сетей (соответственно, имеют относительно небольшую емкость) практически не зависят от способа соединения нейтрали электрической сети с землей.

Известно, что ограничения внутренних перенапряжений проводится различными способами с использованием заземляющих дугогасящих реакторов; резисторов заземления нейтрали, нелинейных ограничителей перенапряжений и вентильных разрядников; резисторов шунтирующих дугогасящие промежутки выключателей; RC-цепочек, ограничивающих коммутационные перенапряжения при отключении ВВ силовых трансформаторов и электродвигателей, а также управлением моментом замыкания контактов выключателя при включении и отключении. В таблице приведены уровни коммутационных перенапряжений в сетях среднего класса напряжений и однофазных дуговых замыканиях на землю.

Таблица 1 - Уровни коммутационных перенапряжений в сетях от 6 до 35 кВт однофазных дуговых замыканиях на землю

Вид коммутации	Максимальная кратность неограниченных перенапряжений	Рекомендуемый уровень ограничения
1 Включение ВЛ и КЛ в нормальном симметричном режиме	2,0	–
2 Включение ВЛ и КЛ при наличии в сети ОЗЗ	3,0–3,5	2,6–2,8
3 Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	4,0–4,3	2,6–2,8
4 Отключение ненагруженных трансформаторов	5,0–6,0	3,0–4,3
5 Отключение двойного замыкания на землю	3,3	2,6–3,0
6 Включение электродвигателей при нормальном режиме сети 6–10 кВ	3,0–3,1	2,6–2,8
7 Включение электродвигателей при наличии в сети (6–10) кВ ОЗЗ	3,4	2,6–2,8
8 Включение электродвигателей в процессе АВР и АПВ в сети (6–10) кВ	4,2	2,6–2,8
9 Отключение вращающихся электродвигателей (6–10) кВ	4,0–5,0	2,6–2,8
10 Отключение заторможенных электродвигателей (6–10) кВ	5,0–6,0	2,6–2,8
Коммутации вакуумными выключателями индуктивных токов в сети (6–10) кВ: 11 а) срез тока при отключении заторможенного электродвигателя в конце кабеля; 12 б) то же, но при больших мощности электродвигателя и длине кабеля; 13 в) эскалация напряжения; 14 г) виртуальный срез тока	5,0–8,0  2,6–2,9 6,0–8,0 крайне высокие кратности, но очень малая вероятность реализации	2,6–2,8
15 ОДЗ в сетях с изолированной нейтралью	3,0–3,5	2,4–2,6
16 ОДЗ в сетях с резонансно заземлённой нейтралью	2,7–3,5	2,4–2,6

Проанализировав данные таблицы можно сказать, что наибольшая кратность перенапряжений возникает при отключении заторможенных электродвигателей от 6 до 10 кВ как при коммутации малообъемными масляными выключателями, так и при коммутации вакуумными выключателями. Эти перенапряжения возникают в РУ от 6 до 10 кВ. Перенапряжения, зона действия которых охватывает всю сеть среднего класса напряжения, являются глобальными для данной сети. Возникают они при однофазных дуговых замыканиях на землю и феррорезонансных явлениях, связанных с трансформаторами напряжения.

Для надежной работы изоляции от коммутационных перенапряжений используются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и RC-цепочки. Однако,

нужно учесть тот факт что ОПН начинает влиять на напряжение лишь при определенном повышении напряжения, он практически не оказывает никакого влияния на начальной стадии процесса, которая характеризуется достаточно высокими частотами, а, следовательно, и возможными значительными перенапряжениями на вилковой изоляции электрической машины.

RC-цепочка существенно влияет на изменение частоты собственных колебаний процесса при отключении тока промышленной частоты. Поэтому вероятность повторных зажигания дуги на контактах ВВ при оснащении двигателя RC-цепочкой - снижается. Конденсаторы снижают волновое сопротивление цепи, ограничивая перенапряжения вызванные срезом тока. Резисторы способствуют затуханию высокочастотного тока, уменьшают вероятность повторных зажигания, ограничивают воздействие на другие фазы. Однако, если же при относительно низкой скорости восстановления электрической прочности в вакуумных дугогасительных камерах даже при установке RC-цепочки произойдет повторное зажигание дуги, то на дальнейший характер процесса, характеризующийся весьма высокими частотами собственных колебаний, RC-цепочки практически не оказывают влияния.

Надежная эксплуатация изоляции сетей среднего напряжения может быть обеспечена при полном учете условий ее эксплуатации на всех стадиях сооружения электроэнергетических объектов: при их проектировании, конструировании оборудования, технологии его изготовления, организации обслуживания в эксплуатации.

В связи с этим совокупность состояний изоляции в электрических сетях среднего напряжения представляется технической системой. Система не детерминируется однозначно совокупностью элементов и не сводится к ним, а наоборот, элементы детерминируются целым комплексом, в рамках которого и получают свое функциональное назначение. При этом у системы в целом появляются новые свойства, отсутствующие у её элементов. Системный анализ применительно к состоянию изоляции электрических сетей предполагает: установление границ исследуемой системы заданного назначения как целого, т.е. выделение из окружающей среды; определение целей системы, критериев качества её функционирования и методов расчета; декомпозиция системы на составные части (подсистемы), которые на более низком уровне иерархии рассматриваются как подсистемы; исследование системы во всех требуемых целевым назначением аспектах с учетом всех значимых связей как между частями одного уровня, так и между различными уровнями.

Методами эквивалентирования (декомпозиция и агрегирование) системного анализа определены условия качественного функционирования электрических сетей среднего напряжения. Поэтому главный аспект системного анализа применительно к задачам исследования кондуктивных электромагнитных помех по импульсному напряжению формулируется как обеспечение условий оптимального функционирования электрических сетей от 6 до 35 кВ на основе применения новых решений.

#### Список использованных источников

1. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них / К.П.Кадомская [и др.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
2. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Е.В.Иванова; под ред. В.П.Горелова, Н.Н.Лизалека. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. – 432 с.
3. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6-10 кВ / Е.В.Иванова, А.А.Руппель; под ред. В.П.Горелова. – Омск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – 284 с.